СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ
BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES

CC BY

Check for updates

УДК 69.07
https://doi.org/10.23947/2949–1835-2024-3-2-7-16

Оригинальное эмпирическое исследование

Оптимизация конструкции карнизного узла рамы из круглых труб

С.В. Щуцкий ✉, **А.А. Лиманцев**, **С.В. Скуратов**, **К.В. Левенец**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ svpike1@rambler.ru

EDN: INMMMQ

Аннотация

Введение. Статья посвящена оптимизации конструкции карнизного узла рамы, выполненной из круглых труб. Рассмотрена стальная решетчатая рама пролетом 66 м. Ригель рамы в виде фермы передает усилия через жесткий карнизный узел на стойку рамы. В подобных конструкциях максимальные изгибающие моменты воспринимает карнизный узел, регулирование геометрии которого является одной из задач оптимального проектирования. Целью данной работы является создание наиболее рационального конструктивного решения данного узла.

Материалы и методы. В решетчатых рамах с внутренней стороны сходятся, в зависимости от выбранной конструкции, 5–7 элементов, которые испытывают напряжение сжатия. Классические варианты выполнения данного узла приводят к необходимости применения более толстостенных труб, что является причиной перерасхода материала. В ходе исследования были выполнены моделирование и расчет карнизного узла в различных вариантах исполнения. В ходе анализа результатов расчета были определены недостатки рассмотренного карнизного узла рамы.

Результаты исследования. В результате оптимизации конструкции узла был предложен новый вариант, в котором соединение нижнего пояса выполнено при помощи прорезной фасонки. Данное решение позволяет наиболее полно использовать несущую способность сечения нижнего пояса.

Обсуждение и заключение. В результате оптимизации предлагаемая конструкция карнизного узла позволяет снизить металлоемкость при сохранении относительной простоты изготовления. При этом за счет снижения локальных напряжений удается добиться большей прочности и надежности карнизного узла.

Ключевые слова: стальная рама, круглая труба, оптимизация, локальные напряжения, металлоемкость

Для цитирования. Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Скуратов С.В., Левенец К.В. Оптимизация конструкции карнизного узла рамы из круглых труб. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-7-16

Original Empirical Research

Design Optimisation of a Truss-to-Column Connection in a Frame Structure Made of Round Tubes

Sergei V. Shchutsky ✉, **Aleksei A. Limantsev**, **Sergei V. Skuratov**, **Kristina V. Levenets**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ svpike1@rambler.ru

Abstract

Introduction. The article investigates the ways to optimise the design of a truss-to-column connection in a frame structure made of round tubes. A steel lattice frame with a span of 66 m has been studied. A spanning member of a frame in the form of a truss transmits loads to a frame column through a rigid truss-to-column connection. In such structures, the maximum bending moments are applied to a truss-to-column connection, thus the problem of regulating its geometry is one of the objectives to be solved within the optimal designing. The aim of this paper is to create the most rational design solution for such a connection.

Materials and Methods. In the lattice frames, depending on the chosen design, 5 to 7 members subject to compression stress converge at its inner side. The conventional variants of executing this connection would require using the heavy

© Щуцкий С.В., Лиманцев А.А., Скуратов С.В., Левенец К.В., 2024

wall tubes which would result in the excess of material consumption. Within the research, modeling and calculation of various configurations of the truss-to-column connection were executed. The analysis of the calculation results revealed the shortcomings of the studied truss-to-column connection in a frame structure.

Results. As a result of the connection design optimisation, a new configuration was suggested, where the connection of a bottom chord was executed by a slotted gusset plate. Such a solution allows for the most complete use of the bearing capacity of the bottom chord cross section.

Discussion and Conclusion. As a result of the optimisation, the proposed design of a truss-to-column connection makes it possible to reduce the metal consumption while maintaining the relative simplicity of manufacture. At the same time, by reducing the local stresses, it is possible to achieve the greater strength and reliability of a truss-to-column connection.

Keywords: steel frame, round tube, optimisation, local stresses, metal consumption

For citation. Shchutsky SV, Limantsev AA, Skuratov SV, Levenets KV. Design Optimisation of a Truss-to-Column Connection in a Frame Structure Made of Round Tubes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2024;3(2):7–16. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-2-7-16

Введение. В процесе проектирования строительной конструкции проектировщик должен стемиться создать наилучшее решение, которое будет отвечать как минимальному расходу материала, так и технологичности изготовления и монтажа, а также надежности конструкции. В связи с этим возникает задача оптимального проектирования [1–4].

Для решения задачи оптимального проектирования удобнее всего использовать метод математического моделирования. Исследование объектов с помощью этого метода позволяет проникнуть в сущность изучаемых объектов и дает возможность решения сложных задач.

В данной статье рассмотрен процесс оптимизации карнизного узла стальной решетчатой рамы с элементами из круглых труб пролетом 66 м (рис. 1). Ригель рамы выполнен в виде арочной фермы, передающей усилия через жесткий карнизный узел на стойку рамы — вертикальную решетчатую конструкцию. Таким образом, аналитическая модель данной конструкции — рама с жестким сопряжением стойки и ригеля. В подобных конструкциях максимальные изгибающие моменты воспринимает карнизный узел, регулирование геометрии которого является одной из задач оптимального проектирования [5, 6].

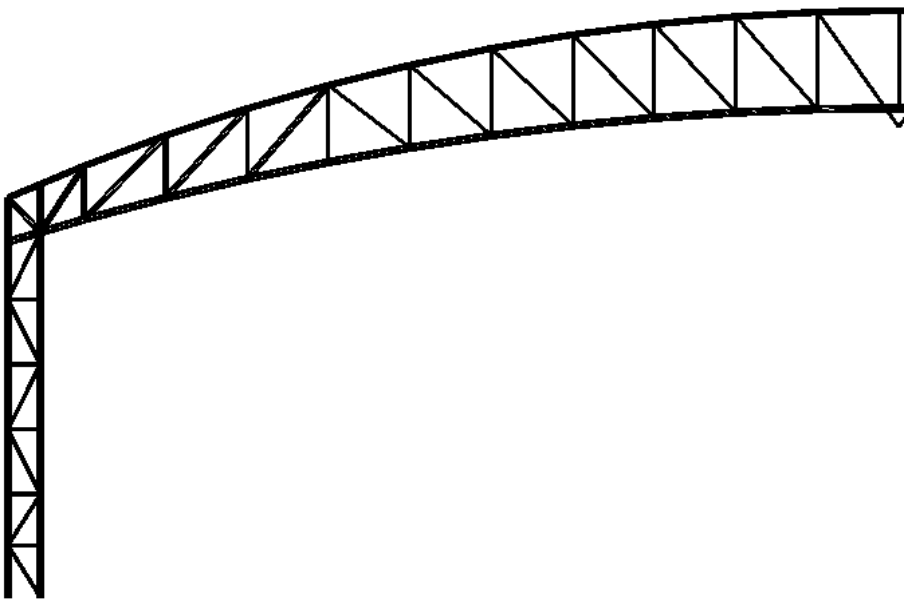


Рис. 1. Полурама рассматриваемой конструкции

Материалы и методы. Существуют три распространенных способа крепления друг к другу элементов трубчатого сечения [7, 8]:

– прорезка элемента с последующим монтажом в прорезь фасонного листового проката, приваренного к основному элементу;

– прессование концов присоединяемой трубы и монтаж на фасонку основного элемента посредством сварки или болтового соединения;

– обрезка присоединяемой трубы по контуру основного элемента с последующей сваркой монтируемых элементов.

https://www.stsg-donstu.ru

Первый способ характеризуется наиболее упрощенным технологическим процессом и позволяет конструировать узлы с продольными усилиями больше 7 тонн [9].

Второй способ технологически сложен и наиболее актуален при конструировании мобильных сооружений с высокой частотой сборки и разборки конструкций [7, 10, 11].

Третий способ наиболее сложен и возможен только при заводском изготовлении конструкций. В отличие от первого и второго способов стыковки третий способ более равномерно распределяет нагрузку от прикрепляемого элемента, не концентрируя ее в зоне примыкания фасонки к основному элементу узла [9, 10]. В результате расчета получаем, что все сходящиеся в рассматриваемом узле элементы испытывают сжимающие усилия в диапазоне от –62 до –1270 кН (рис. 2).

Основные элементы, на которые передаются сжимающие усилия, подвержены влиянию локальных напряжений в местах присоединения фасонок или непосредственно элементов решеток рам и ферм. При достаточной разнице в размерах сечений присоединяемых и основных элементов узла стенки элементов, воспринимающих большие усилия, испытывают локальные моменты, приводящие к продавливанию или выдергиванию стенки элементов [12].

Наибольшее сопротивление локальным напряжениям имеют элементы с наибольшей толщиной стенок. В данном узле такими элементами являются внутренний пояс стойки рамы, нижний пояс ригеля рамы и опорный раскос. Данные элементы могут быть назначены в качестве основных элементов карнизного узла, к которым осуществляется присоединение элементов с меньшей толщиной стенок, воспринимающих меньшие сжимающие усилия.

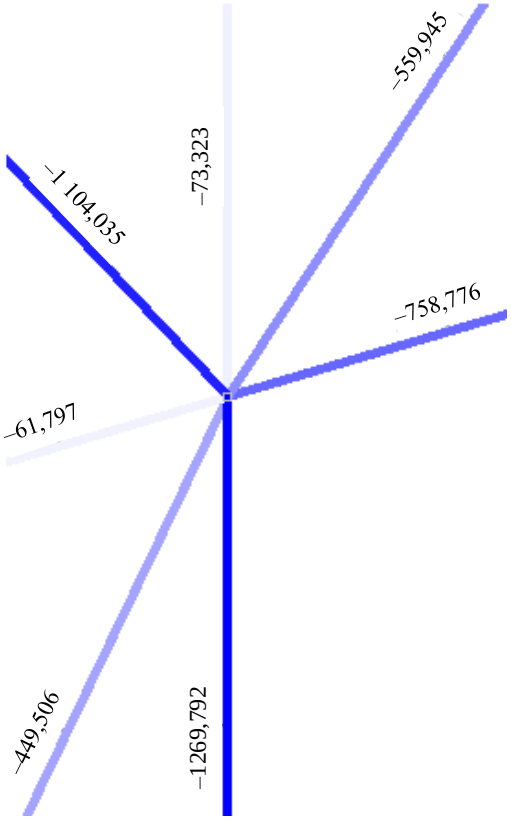


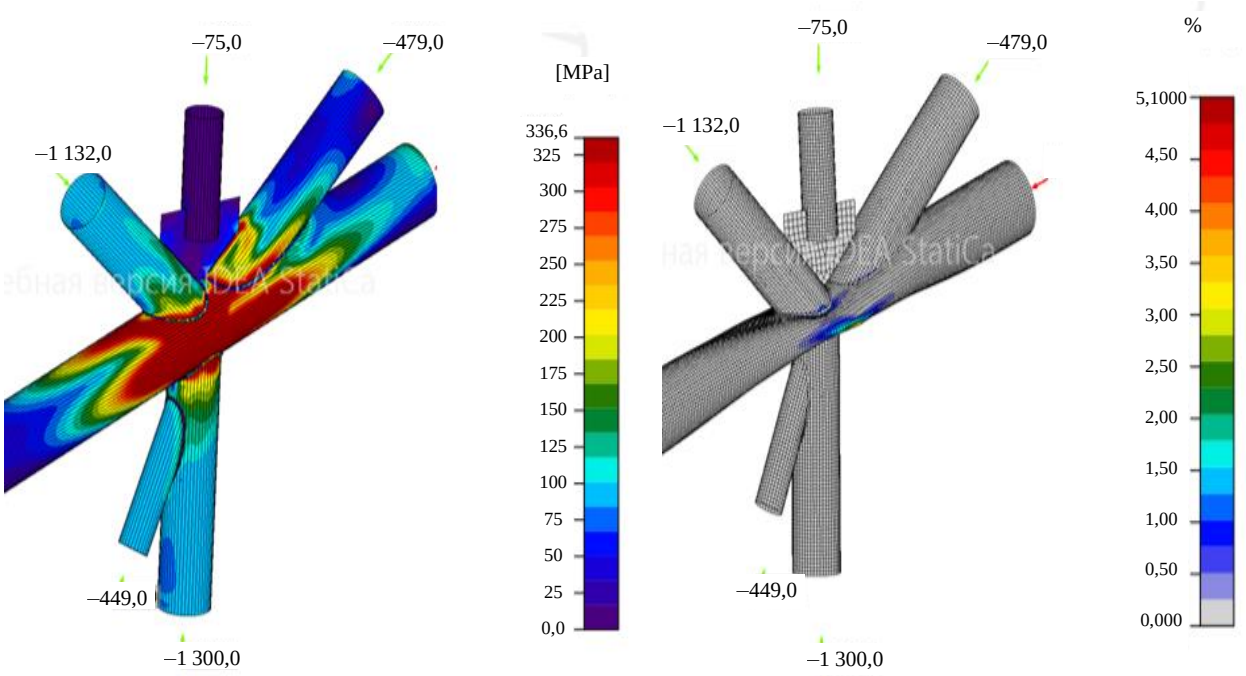
Рис. 2. Усилия в карнизном узле рамы

Карнизный узел смоделирован в программе TeklaStructures с последующим экспортом в среду IdeaStatiCa, в которой реализована возможность нелинейного анализа конструкции по деформированной схеме, наиболее полно отражающей работу конструкции [13–15].

Кончено-элементный анализ узла с учетом нелинейной зависимости «напряжение — деформация» показал, что конструкция узла без усиливающих пластин переходит в пластичную стадию работы вследствие обжатия нижнего пояса примыкающими элементами. Раскосы и внутренний пояс стойки рамы сдавливают пояс таким образом, что его боковые стенки выходят из плоскости приложения нагрузок (рис. 3).

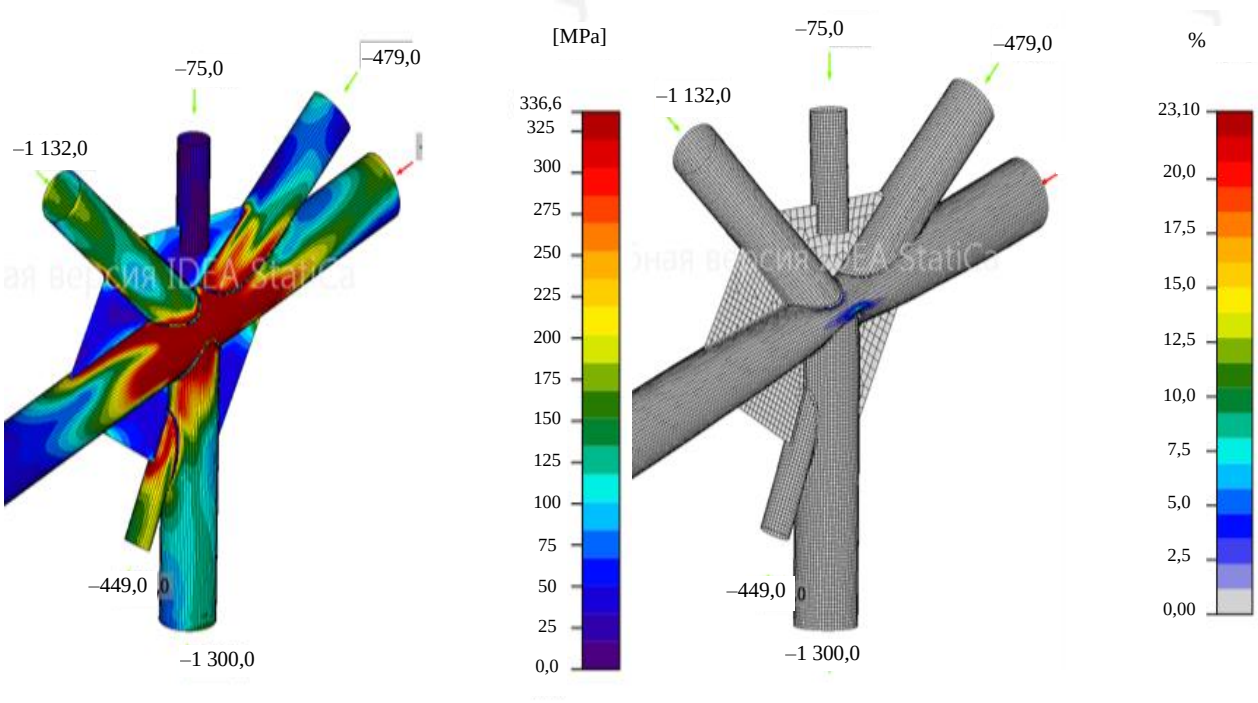
Добавление усиливающих пластин в теории позволяет более равномерно распределить нагрузку от примыкающих элементов к нижнему поясу арки. Монтаж усиливающих пластин удорожает производство конструкции. Согласно таблицам, изложенным в литературе по расчету и проектированию металлических конструкций [11, 16, 17], толщина фасонок при усилиях от 700 до 1 300 кН варьируется от 14 до 16 мм. Согласно

требованию п. 14.1.7а СП 16.13330.2017 катет сварного шва не должен превышать 1,2 толщины стенок свариваемых элементов. При значении длины углового шва на стыке пояса стойки рамы и нижнего пояса ригеля рамы менее 860 мм, которое получается во всех вариантах соединения, требуемый катет шва равен 10 мм. Следовательно, для исполнения узла данным способом необходимо обеспечить минимальную толщину стенок поясов ригеля и стойки рамы, равную 9 мм.



а) *б)*

Рис. 3. Визуализация результатов расчета бесфасонного соединения карнизного узла в ПК IdeaStatiCa:
а — напряжения; *б* — деформация



а) *б)*

Рис. 4. Визуализация результатов расчета карнизного узла с прорезью фасонками в ПК IdeaStatiCa:
а — напряжения; *б* — деформация

https://www.stsg-donstu.ru

При бесфасоночном соединении максимальные напряжения в узле составляют 355,8 МПа (рис. 5).

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✗	NP	C345	336,6	9,0	LE1	355,8	9,3	0,0
	✓	R1	C345	336,6	6,0	LE1	339,5	1,4	0,0
	✓	R2	C345	336,6	8,0	LE1	338,8	1,1	0,0
	✗	SO	C345	336,6	9,0	LE1	348,1	5,6	0,0
	✓	S1	C345	336,6	6,0	LE1	79,5	0,0	0,0
	✓	R3	C345	336,6	4,0	LE1	205,8	0,0	0,0
	✓	f1	C345 - 1	317,1	14,0	LE1	122,0	0,0	0,0

Рис. 5. Результаты проверки бесфасоночного соединения карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Соединение с прорезью фасонками не снижает в достаточной степени локальные напряжения в зоне примыкания элементов раскосов. Испытываемые напряжения превышают расчетное сопротивление нижнего пояса решетчатой фермы (рис. 6).

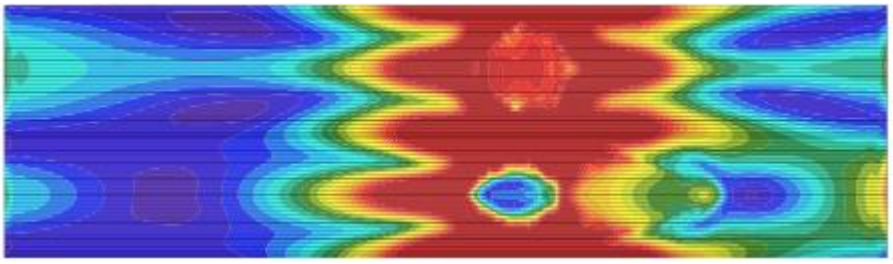
Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✗	NP	C345	336,6	9,0	LE1	355,9	9,4	0,0
	✓	R1	C345	336,6	6,0	LE1	340,2	1,7	0,0
	✓	R2	C345	336,6	8,0	LE1	338,5	0,9	0,0
	✗	SO	C345	336,6	9,0	LE1	348,5	5,8	0,0
	✓	S1	C345	336,6	6,0	LE1	101,9	0,0	0,0
	✓	R3	C345	336,6	4,0	LE1	336,6	0,0	0,0
	✓	f1	C345 - 1	317,1	14,0	LE1	186,9	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	184,4	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	132,3	0,0	0,0
	✓	УсилПл4	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	257,2	0,0	0,0

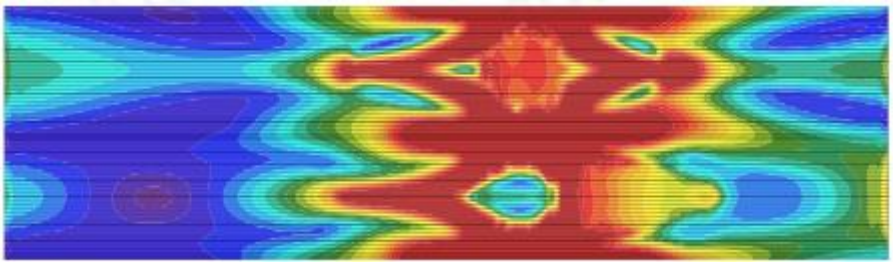
Рис. 6. Результаты проверки соединения с прорезью фасонками карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Анализ диаграммы распределения напряжений в нижнем поясе позволяет сделать вывод о том, что при соединении с прорезью фасонками напряжения распределяются более равномерно, однако абсолютное значение максимума локальных напряжений остается неизменным и достигается вокруг контура стыка пояса стойки рамы и пояса ригеля рамы (рис. 7).

Таким образом, реализация карнизного узла, в котором геометрия рамы предполагает использование нижнего пояса решетчатой фермы в качестве основного элемента карнизного узла, невозможна без дополнительного усиления стенок поясов. Удовлетворительных значений локальных напряжений удалось достичь лишь при местном увеличении толщины стенки пояса арки до 16 мм (рис. 8).



а)



б)

Рис. 7. Диаграммы распределения напряжения в нижнем поясе:
а — при бесфасоночном соединении; *б* — при соединении с прорезью фасонками

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	NP	C345	317,1	16,0	LE1	318,8	0,8	0,0
	✓	R1	C345 - 1	336,6	6,0	LE1	336,8	0,1	0,0
	✓	R2	C345 - 1	336,6	8,0	LE1	337,8	0,6	0,0
	✓	SO	C345	317,1	12,0	LE1	318,4	0,7	0,0
	✓	S1	C345 - 1	336,6	6,0	LE1	107,8	0,0	0,0
	✓	R3	C345 - 1	336,6	4,0	LE1	336,7	0,1	0,0
	✓	f1	C345	317,1	14,0	LE1	105,6	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345	317,1	16,0	LE1	127,8	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345	317,1	16,0	LE1	122,1	0,0	0,0
	✓	УсилПл4	C345	317,1	16,0	LE1	207,3	0,0	0,0

Рис. 8. Результаты проверки соединения с прорезью фасонками и с усилением стенок нижнего пояса в 1 варианте карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Проблема поверхностной пластичности поясов фермы в карнизном узле, выполненном согласно рис. 3, 4, подробно рассмотрена в работе Wenwei Yang [18].

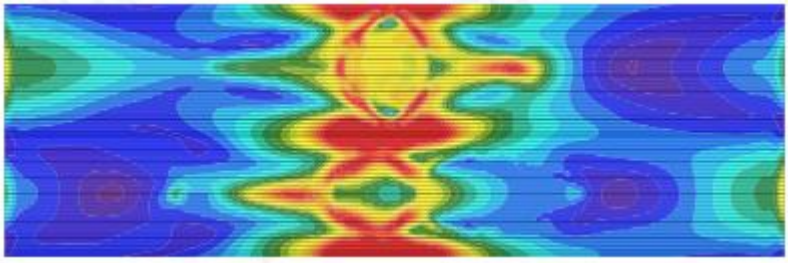


Рис. 9. Диаграмма распределения напряжений в нижнем поясе с усилением пояса

https://www.stsg-donstu.ru

Локальное увеличение толщины пояса на 8 мм в зоне карнизного узла сопряжено со значительным удорожанием конструкции вследствие применения нестандартных решений и сложности изготовления нетипового трубного проката.

Данная проблема решается добавлением подкоса между ригелем и стойкой рамы (рис. 10), перераспределяющего усилия таким образом, чтобы устранить обжатие нижнего пояса в карнизном узле.

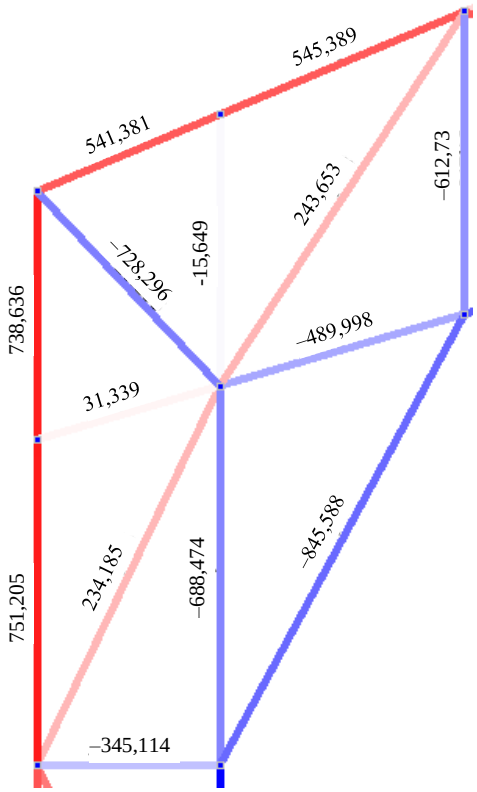
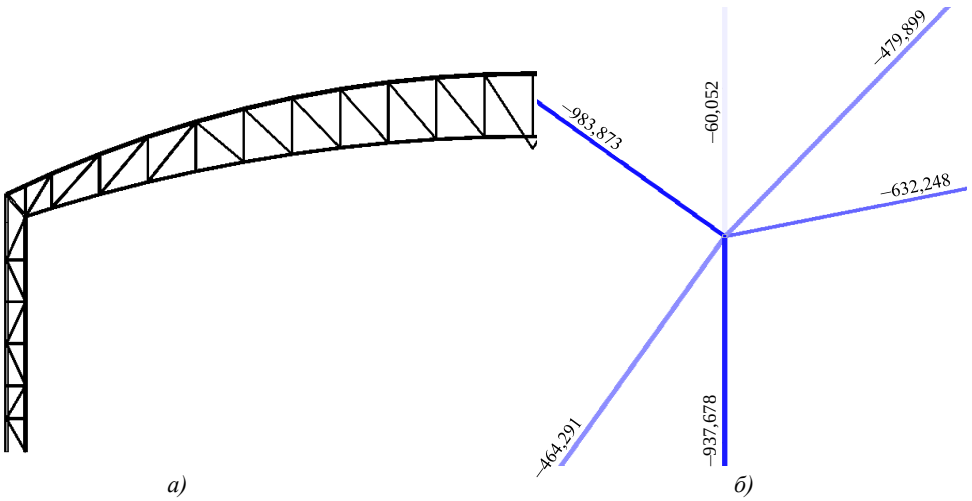


Рис. 10. Перераспределение усилий при добавлении дополнительного подкоса

Следствием добавления дополнительного подкоса является увеличение материалоемкости вариантов конструирования с наибольшими материалозатратами из всех вариантов конструирования.

Результаты исследования. Изменение конструкции рамы, а именно исключение крайнего сегмента нижнего пояса в карнизном узле, приводит к отсутствию обжатия нижнего пояса. Стержень нижнего пояса соединяется в узле с другими стержнями через горизонтальную пластину. Примыкание раскоса стойки рамы осуществлено без смещения по вертикали от узла, что позволяет устранить эксцентриситет в поясе стойки рамы (рис. 11).

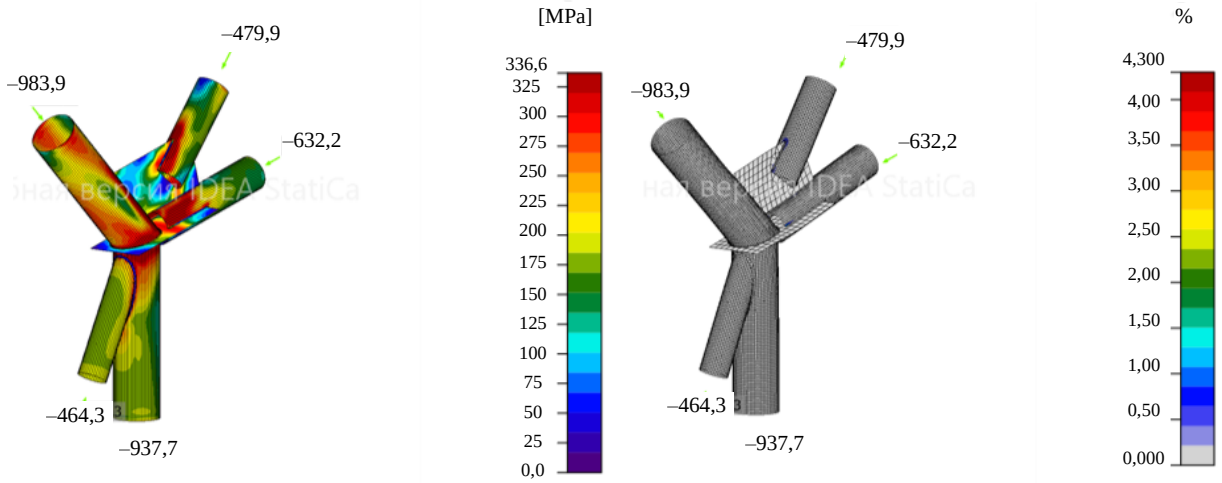


а) *б)*

Рис. 11. Второй вариант конструирования рамы: *а* — схема полурамы; *б* — усилия в стержнях карнизного узла

В предложенном варианте исполнения узла основных элемента два: опорный раскос и внутренний пояс стойки рамы. Сопряжение данных элементов осуществлено таким образом, чтобы образовать выгиб конструкции

по направлению к сжимающей нагрузке от нижнего пояса. Основные элементы соединены через фасонку, расположенную параллельно нижнему поясу. Осуществлена прорезка нижнего пояса на расчетную величину сварного шва. Таким образом, предложенная конструкция карнизного узлового соединения является наиболее оптимальной для рассматриваемой решетчатой рамы.



а) *б)*

Рис. 12. Визуализация результатов расчета карнизного узла четвертого варианта конструирования в ПК IdeaStatiCa: *а* — напряжения; *б* — деформация

Проверка элементов и пластин для наихудшего загружения

	Статус	Элемент	Материал	Ry [MPa]	Th\\\ [mm]	Нагрузки	σ [MPa]	ε,pl [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	NP	C345	336,6	7,0	LE1	343,4	3,3	0,0
	✓	R1	C345	336,6	7,0	LE1	339,5	1,4	0,0
	✓	R2	C345	336,6	6,0	LE1	343,6	3,4	0,0
	✓	SO	C345	336,6	7,0	LE1	337,3	0,3	0,0
	✓	R3	C345	336,6	5,0	LE1	336,6	0,0	0,0
	✓	УсилПл2	C345 - 1	317,1	16,0	LE1	317,2	0,0	0,0
	✓	УсилПл3	C345 - 1	317,1	12,0	LE1	318,0	0,4	0,0

Рис. 13. Результаты проверки соединения в 4 варианте карнизного узла в среде IdeaStatiCa (фрагмент программы)

Обсуждение и заключение. В результате выполненного исследования предложен узел, в котором отсутствует элемент, испытывающий сжимающие усилия, направленные с противоположных сторон. При таком конструктивном решении элементы узла меньше подвержены влиянию локальных напряжений, что приводит к снижению металлоемкости конструкции за счет использования стержней из труб с меньшей толщиной стенки и отсутствию необходимости дополнительного локального усиления.

Список литературы / References

1. Coduto DP, Kitch WA, Man-chu RY. *Foundation design: principle and practices.* Boston Columbus, Indianapolis, etc.: Pearson Education, Inc.; 2016. 960 p. URL: https://istasazeh-co.com/pdf/Foundation-design-principles-and-practices-Donald-P-Coduto.pdf (accessed: 01.04.2024).

2. Кузнецов В.В. (ред.). Справочник проектировщика. Том 3. Москва.: АСВ; 1999. 528 с. URL: https://s.siteapi.org/411667c697289ee.ru/docs/fc7956b158cafcb08994c5b2b10de03502fbd72a.pdf (дата обращения: 18.03.2024).

Kuznetsov VV. (ed.). *Designer's Handbook. Volume 3*. Moscow: ACB; 1999. 528 p. URL: https://s.siteapi.org/411667c697289ee.ru/docs/fc7956b158cafcb08994c5b2b10de03502fbd72a.pdf (accessed: 18.03.2024). (In Russ.).

3. Щуцкий С.В., Скуратов С.В., Лиманцев А.А. Методика проектирования стальных рам переменного сечения из прокатных двутавров. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2022;1(4):4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14

Shchutsky SV, Skuratov SV, Limantsev AA. Methodology for Designing the Steel Frames of Variable Cross-Section from Rolled I-Beams. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;1(4):4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14 (In Russ.).

4. Щуцкий С.В., Коржов С.В., Лиманцев А.А. Исследование работы стальных рам с элементами переменного сечения, образованных путем диагонального роспуска двутавров по ГОСТ Р 57837–2017. *Инженерный вестник Дона*. 2022;(11). URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8034 (дата обращения: 16.03.2024).

Shchutsky SV, Korzhov SV, Limantsev AA. Investigation of the Operation of Steel Frames with Elements of Variable Cross-Section formed by Diagonal Dissolution of I-Beams according to GOST R 57837–2017. *Engineering Journal of Don*. 2022;(11). URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__11_Shchutsky_Korzhov_Limantsev.pdf_49f5fe6cd9.pdf (accessed: 16.03.2024). (In Russ.).

5. Катюшин В.В. *Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения.* Монография. Москва.: АСВ; 2018. 1072 с.

Katyushin VV. *Buildings with Frames Made of Steel Frames of Variable Cross-Section*. Monograph. Moscow: ASV; 2018. 1072 p. (In Russ.).

6. Palmer AC. Optimal Structure Design by Dynamic Programming. *Journal of the Structural Division.* 1968;94(8):1887–1906. https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002035

7. Киселев Д.Б. *Работа комбинированной арочной системы с учетом геометрической нелинейности и последовательности монтажа.* Дисс. канд. техн. наук. Москва.; 2009. 183 с.

Kiselev DB. *Operation of the Combined Arch System Taking into Account Geometric Nonlinearity and Sequence of Installation*. Cand.Sci. (Engineering) Dissertation. Moscow; 2009. 183 p. (In Russ.).

8. Thornton WA, Holland MV, Aminmansour A, Carter CJ, Cole HA, Davis DB (eds.) *Design Examples. For Use in First Semester Structural Steel Design Classes*. Version 14.0. USA: American Institute of Steel Construction; 2011. 125 p. URL: https://www.aisc.org/globalassets/aisc/university-programs/teaching-aids/first-semester-design-examples.pdf (accessed: 20.03.2024)

9. Nageim HA, MacGinley TJ. *Steel Structures. Practical Design Studies.* Third Edition. CRC Press; 2005. 352 p.

10. Москалев Н.С., Пронозин Я.А. *Металлические конструкции.* Москва.: Издательство Ассоциации строительных вузов; 2010. 344 с.

Moskalev NS, Pronozin YaA. *Metal Structures*. Moscow: Association of Civil Engineering Universities Publishing House; 2010. 344 p. (In Russ.).

11. Запросян А.О., Леонова Д.А., Шкрылев Р.А. Технико-экономическое обоснование унификации элементов металлических стропильных ферм. *Инженерный вестник Дона*. 2021;8 URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7148 (дата обращения: 20.03.2024).

Zaprosyan AO, Leonova DA, Shkrylev RA. Feasibility Study of the Unification of Metal Truss Frame Elements. *Engineering Journal of Don*. 2021;(8) URL: https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7148 (accessed: 20.03.2024). (In Russ.).

12. Москалев Н.С., Пронозин Я.А., Парлашкевич В.С., Корсун Н.Д. *Металлические конструкции, включая сварку.* Москва.: Издательство АСВ; 2014. 352 с.

Moskalev NS, Pronozin YaA, Parlashkevich VS, Korsun ND. *Metal Structures, Including Welding*. Moscow: ASV Publishing House; 2014. 352 p. (In Russ.).

13. Gillman A, Fuchi K, Buskohl PR. Truss-based Nonlinear Mechanical Analysis for Origami Structures Exhibiting Bifurcation and Limit Point Instabilities. *International Journal of Solids and Structure*. 2018;147:80–93. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.05.011

14. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. *Компьютерное моделирование в задачах строительной механики.* Москва.: Издательство АСВ; 2016. 338 с.

Gorodetsky AS, Barabash MS, Sidorov VN. *Computer Modeling in Problems of Structural Mechanics*. Moscow: ASV Publishing House; 2016. 338 p. (In Russ.).

15. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. *Расчетные модели сооружений и возможность их анализа*. Москва.: ДМК Пресс; 2007. 600 с.

Perelmuter AV, Slivker VI. *Design Models of Structures and the Possibility of Their Analysis*. Moscow: DMK Press; 2007. 600 p. (In Russ.).

16. Беленя Е.И. *Металлические конструкции.* Москва.: Стройиздат; 1976.
Belenya EI. *Metal Structures*. Moscow: Stroiizdat; 1976. (In Russ.).
17. Мельников Н.П. *Металлические конструкции.* Москва.: Стройиздат; 1980.
Melnikov NP. *Metal Structures*. Moscow: Stroiizdat; 1980. (In Russ.).
18. Yang W, Lin J, Gao N, Yan R. Experimental Study on the Static Behavior of Reinforced Warren Circular Hollow Section (CHS) Tubular Trusses. *Applied Sciences.* 2018;8(11):2237. https://doi.org/10.3390/app8112237

Об авторах:
Щуцкий Сергей Викторович, доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, alimantsev@gmail.com

Скуратов Сергей Викторович, доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Левенец Кристина Валерьевна, магистрант кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, levkristina@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
С.В. Щуцкий: формирование основной концепции, корректировка выводов.
А.А. Лиманцев: доработка текста, формирование выводов.
С.В. Скуратов: доработка текста, корректировка выводов.
К.В. Левенец: компьютерное моделирование и расчет, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Поступила в редакцию 03.04.2024
Поступила после рецензирования 24.04.2024
Принята к публикации 06.05.2024

About the Authors:
Sergei V. Shchutsky, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF)**,** ORCID, svpike1@rambler.ru

Aleksei A. Limantsev, Senior Lecturer of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, alimantsev@gmail.com

Sergei V. Skuratov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, svpike1@rambler.ru

Kristina V. Levenets, Master's Student of the Metal, Wood and Plastic Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, levkristina@mail.ru

Claimed Contributorship:
SV Shchutsky: formulating the main concept, correcting the conclusions.
AA Limantsev: refining the text, formulating the conclusions.
SV Skuratov: refining the text, correcting the conclusions.
KV Levenets: computer modeling and calculations, preparing the text, formulating the conclusions.

Conflict of Interest Statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Received 03.04.2024
Revised 24.04.2024
Accepted 06.05.2024